

**В. В. Васильев, С. А. Дворецкий, Д. Г. Есаев, Т. И. Захарьяш,
А. Г. Клименко, А. И. Козлов, И. В. Марчишин, В. Н. Овсяк,
Н. Х. Талипов, Ю. Г. Сидоров, А. О. Сусяков**

(Новосибирск)

**ФОТОПРИЕМНИКИ НА ОСНОВЕ СЛОЕВ CdHgTe ,
ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ**

Разработана полная технология изготовления матричных и одиночных фотоприемников, включающая выращивание слоев кадмий–ртуть–теллур методом молекулярно-лучевой эпитаксии, изготовление фотоприемных структур на их основе, изготовление матричных и линейчатых кремниевых мультиплексоров и гибридную сборку фотоприемников и мультиплексоров с помощью индиевых микростолбов. Приведены фотоэлектрические параметры матричных и линейчатых фотоприемников на основе фотодиодов, а также одиночных фотоприемников на основе фоторезисторов для среднего (3–5,5 мкм) и дальнего (8–12 мкм) ИК-диапазонов, работающих при температуре 78–80 и 200–220 К.

Введение. Базовым материалом для разработки и производства инфракрасных (ИК) фотоприемников (ФП) является твердый раствор кадмий–ртуть–теллур (КРТ). Фотоприемники на основе КРТ различного состава обеспечивают регистрацию ИК-излучения в широком диапазоне длин волн (от 1 до 20 мкм и более). Использование всего многообразия физических процессов в указанном материале дает возможность конструировать различные типы ИК ФП, работающие в широком интервале температур (от температуры жидкого азота до комнатной температуры). Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) имеет ряд преимуществ по сравнению с жидкофазной эпитаксией и эпитаксией из металлоорганических соединений. Разработанная технология МЛЭ дает возможность использования аналитических методов для контроля как технологических параметров, так и характеристик слоев CdHgTe в процессе роста [1, 2], что позволяет выращивать эпитаксиальные слои с заданными свойствами.

В данной работе представлена технология изготовления матричных и линейчатых фотоприемных структур размерностью 128×128 и 2×64 элементов с низким последовательным сопротивлением, которая обеспечивает однородный рабочий режим каждого фоточувствительного элемента матрицы и линейки, а также одиночных фоторезисторов на основе эпитаксиальных сло-

ев CdHgTe на подложках GaAs. Приводятся фотоэлектрические параметры изготовленных фотоприемных структур для спектральных диапазонов 3–5,5 и 8–12 мкм с рабочей температурой 78–80 и 200–220 К.

1. Фотоприемники на основе соединений КРТ, полученных методом МЛЭ. Для изготовления фоторезисторов (ФР), охлаждаемых до температур жидкого азота, использовались слои КРТ, полученные с помощью МЛЭ, *n*-типа, а для слабоохлаждаемых ФР – в основном, слои *p*-типа. Пленки КРТ имели широкозонные варизонные слои у границы раздела пленка – подложка и у поверхности. Типичная толщина такого поверхностного слоя составляет 0,5–1,0 мкм с изменением состава на поверхности относительно состава рабочего слоя $\Delta X_{\text{CdTe}} = +(0,15-0,3)$ при толщине рабочего слоя 5–15 мкм.

ФР представляют собой мезаструктуры с активной площадью от $0,1 \times 0,1$ до 1×1 мм и изготавливаются по стандартной технологии с использованием низкотемпературной фотолитографии ($T < 90$ °С). В целях защиты боковых поверхностей мезаструктур обычно проводилась дополнительная пассивация. Для пассивации использовались слои естественного окисла, SiO₂, Si₃N₄ и ZnS. Слои ZnS также были использованы в качестве просветляющего покрытия.

Типичные параметры ФР (77 К) с длинноволновым краем чувствительности (λ_c) в области 10–12 мкм и менее соответствуют приводимым в литературе аналогичным параметрам ФР, изготовленным из объемных кристаллов и пленок, полученных методом жидкофазной эпитаксии. Такие ФР в реальных условиях применения работают в режиме ограничения фоном.

Для длинноволновых ФР с λ_c до 20 мкм типичная обнаружительная способность D^* составляет $\sim 5 \cdot 10^{10}$ (см·Гц^{1/2})/Вт. Слабоохлаждаемые ФР ($T = 200-230$ К) изготавливались, в основном, с $\lambda_c = 5-7,5$ мкм. Обнаружительная способность для фоторезисторов с $\lambda_c \sim 5$ мкм $D^*(\lambda_{\text{max}}, 60^\circ, 1 \text{ Гц}) = (7-9) \cdot 10^{10}$ (см·Гц^{1/2})/Вт, а с $\lambda_c \sim 6,5$ мкм $D^*(\lambda_{\text{max}}, 60^\circ, 1 \text{ Гц}) = (3-5) \times 10^{10}$ (см·Гц^{1/2})/Вт. На основе этих ФР освоено производство фотоприемного модуля, включающего в себя ФР с термоэлектрическим охладителем, усилитель, согласованный по шумам, и электронный блок, обеспечивающий необходимую стабилизацию рабочей точки (температуру и напряжение смещения) [3].

На основе слоев КРТ, полученных методом МЛЭ, с широкозонными слоями изготавливались одиночные фотодиоды различной площади ($1,6 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-2}$ см²), линейки и матрицы *p-n*-переходов. Фотодиоды изготавливались по планарной технологии на пленках *p*-типа, *n*-область формировалась ионной имплантацией бора и в некоторых специальных случаях – термодиффузией ртути из анодного окисла. Обычно проводилась пассивация диэлектрическими слоями, которые использовались как просветляющее покрытие и как изолятор под металлизированную разводку. Отдельные исследования показали, что при наличии широкозонных поверхностных слоев параметры фотодиодов не зависят от дополнительной пассивации диэлектрическими слоями.

Параметры фотодиодов при температуре жидкого азота в целом соответствуют лучшим результатам, приведенным в литературе. Так, значения $R_0 A$ (R_0 – сопротивление, A – площадь) достигают $8 \cdot 10^6$, $6,4 \cdot 10^5$ и $150 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ для фотодиодов с $\lambda_0 = 5,2$; 6,0 и 10,5 мкм соответственно.

Основные параметры фотоприемных модулей на основе соединений CdHgTe

Параметры	Матричный 128 × 128			Билинейный 2 × 64		Одиночный
	6,0	8,7	4,6	8,3	10,0	
Длинноволновая граница чувствительности, мкм	6,0	8,7	4,6	8,3	10,0	6,4
Размер фоточувствительного элемента, мкм	25 × 25			50 × 70		100 × 100
Шаг размещения элементов, мкм	50 × 50			100		–
Рабочая температура, К	78–90		210	78–82		210
Частота кадров, Гц	50			–		–
Время интегрирования*, мкс	930	130	450	100	100	–
Эквивалентная шуму разность температур** ($T_{\phi} = 295$ К), К	0,019 (40°)	0,025 (40°)	0,45 (70°)	0,02 (40°)	0,023 (20°)	–
Обнаружительная способность (500 К)***, (см · Гц ^{1/2})/Вт	–	–	–	$2,92 \cdot 10^{10}$	$5,38 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{10}$
Размеры фотоприемного модуля (не более), мм	9 × 8 × 1,5			22 × 10 × 1,5		2 × 0,5 × 0,4

Примечания. * Время интегрирования для матриц размерностью 128 × 128 может регулироваться в зависимости от фоновой нагрузки в диапазоне от единиц микросекунд до длительности кадра. ** В скобках указан апертурный угол 2Θ , при котором проводились измерения. *** В скобках указана температура АЧТ.

Разработана технология и изготовлены слабоохлаждаемые матричные фотоприемники форматом 128 × 128 элементов и шагом 50 мкм для спектральной области 3–5 мкм на основе слоев КРТ, полученных методом МЛЭ, со специальным профилем состава по толщине. Обнаружительная способность этих фотодиодов достигает $7 \cdot 10^{10}$ (см · Гц^{1/2})/Вт при рабочей температуре 210 К.

Разработаны и изготовлены линейчатый 64-канальный и матричный 128 × 128 мультиплексоры, выполненные по КМОП-технологии. Линейчатый мультиплексор имеет дифференциальный усилитель, ко-

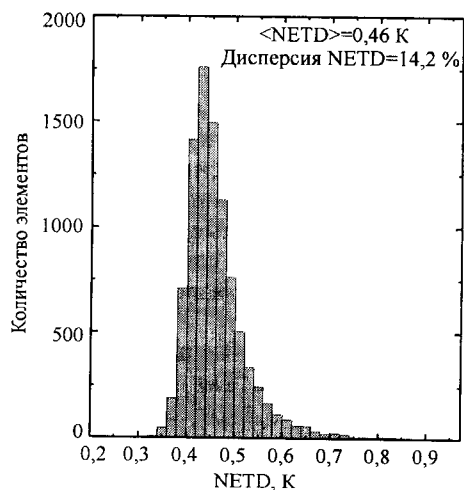


Рис. 1. Гистограмма распределения эквивалентной шуму разности температур (NETD) для слабоохлаждаемого матричного фотоприемного модуля размерностью 128 × 128 элементов с $\lambda_c = 4,65$ мкм. Апертурный угол $2\Theta = 70^\circ$, время накопления 450 мкс

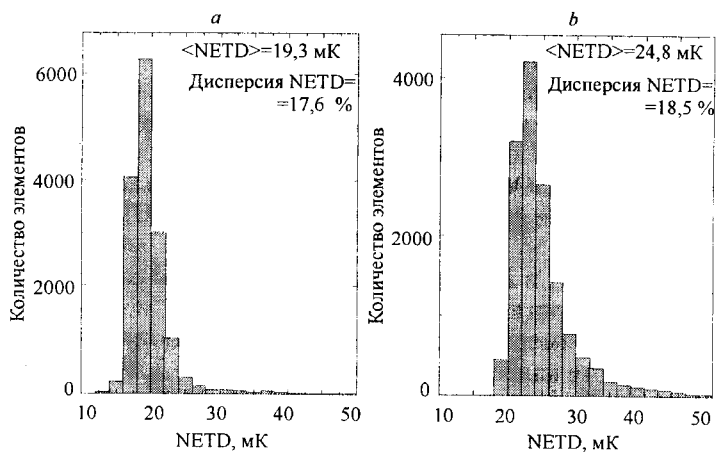


Рис. 2. Гистограммы распределения эквивалентной шуму разности температур (NETD) для двух матричных фотоприемных модулей размерностью 128×128 элементов: $a - \lambda_c = 6,0 \text{ мкм}$, $2\Theta = 40^\circ$, время накопления 930 мкс; $b - \lambda_c = 8,7 \text{ мкм}$, $2\Theta = 40^\circ$, время накопления 130 мкс

торый помимо функции формирования точного термостабильного смещения (с однородностью $\pm 5 \text{ мВ}$) обеспечивает низкое входное сопротивление схемы считывания [4]. Схема считывания матричного мультиплексора позволяет регулировать время накопления при фиксированном времени кадра, что обеспечивает увеличение динамического диапазона ИК-приемника при высоком уровне входных токов [5].

Сборка матричных фотоприемных модулей осуществлялась методом холодной сварки под давлением на двухслойных индиевых микростолбах [6, 7]. Кристаллы мультиплексора и фотоприемной матрицы ориентировали друг относительно друга по осям соединяемых матриц так, что отклонение от идеального совпадения краевых индиевых микростолбов было не более 2 мкм в плоскости планара (XY), а перекося по оси Z не превосходил $\pm 1 \text{ мкм}$. В процессе сжатия кристаллов предусмотрена автопланаризация их поверхностей. К моменту завершения процесса холодной сварки планарные поверх-



Рис. 3. Примеры тепловых изображений, полученных с помощью матричных фотоприемных модулей размерностью 128×128 элементов: $a - \lambda_c = 6,0 \text{ мкм}$, $b - \lambda_c = 8,7 \text{ мкм}$

ности останавливались на заданном расстоянии друг от друга. Подробно процедура сборки описана в [5].

2. Параметры фотоприемных модулей. Определение фотоэлектрических параметров фотоприемников проводилось для одной группы при рабочей температуре 78–80 К и для другой группы – при температуре 200–220 К, температура фона 293 К. Основные параметры некоторых фотоприемных модулей на основе слоев КРТ, полученных методом МЛЭ, приведены в таблице.

Для примера на рис. 1 и 2 представлены гистограммы распределения эквивалентной шуму разности температур для матричных модулей форматом 128×128 элементов. Примеры тепловых изображений, полученных с объективом $F/1,6$ при частоте кадров 50 Гц, показаны на рис. 3. На рис. 3, *a* представлено изображение автомобиля в ночное время с работающим двигателем. Четко видно поперечное расположение двигателя. На рис. 3, *b* представлено изображение человека с поднятой рукой при комнатной температуре. На тыльной стороне ладони видны венозные сосуды.

Заключение. Продемонстрированы возможности молекулярно-лучевой эпитаксии для выращивания гетероэпитаксиальных слоев CdHgTe с заданным профилем состава по глубине на альтернативной подложке GaAs. На таких слоях изготовлены фотоприемные модули для среднего и дальнего ИК-диапазонов с рабочей температурой около 80 и 210 К с высокими фотоэлектрическими параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Liberman V. I. et al. Molecular beam epitaxy of high quality HgCdTe films with control of the composition distribution // Journ. Cryst. Growth. 1996. **159**. P. 1161.
2. Jensen J. E., Roth J. A., Brewer P. D. et al. Integrated multi-sensor control of II–VI MBE for growth of complex IR detector structures // Journ. Electron. Mater. 1999. **27**, N 6. P. 494.
3. Васильев В. В., Варавин В. С., Дворецкий С. А. и др. Фотоприемный модуль для тепловизора // Автометрия. 1998. № 4. С. 43.
4. Васильев В. В., Захарьяш Т. И., Клименко А. Г. и др. Фокальные матрицы 2×64 для спектрального диапазона 8–10 мкм на объемных кристаллах CdHgTe // Автометрия. 1996. № 4. С. 32.
5. Овсяк В. Н., Сидоров Ю. Г., Васильев В. В., Шашкин В. В. Матричные фотоприемники 128×128 на основе слоев HgCdTe и многослойных гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs // Прикл. физика. 2000. № 5. С. 70.
6. Vasilyev V. V., Esaev D. G., Klimenko A. G. et al. Focal plane arrays based on HgCdTe epitaxial layers MBE-grown on GaAs substrates // Proc. SPIE. 1997. **3061**. P. 956.
7. Клименко А. Г., Войнов В. Г., Новоселов А. Р. и др. Особо пластичные индиевые микростолбы для матричных ФПУ на CdHgTe // Автометрия. 1998. № 4. С. 105.

*Институт физики полупроводников СО РАН,
E-mail: vas@thermo.isp.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
5 апреля 2001 г.*